Ⅱ

유도기

1. 유도기의 원리와 구조
2. 단상 유도 전동기
3. 3상 유도 전동기의 동작 원리
4. 3상 유도 전동기의 기전력과 토크 특성



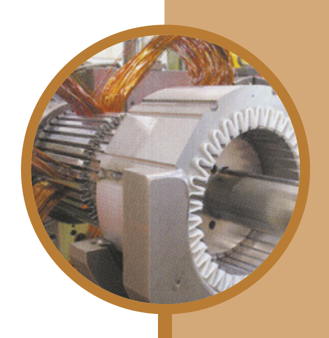

냉장고

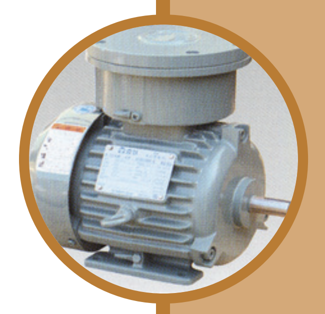

유도 전동기

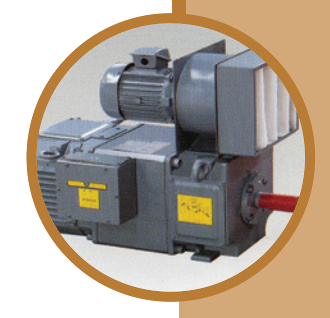



에어컨


공기 압축기







유도기(induction machines)는 유도 전동기, 유도 발전기, 유도 주파수 변환기 유도 상 변환기와 같이 전자기적 유도 전압에 의하여 회전하는 회전 기기를 일컫는 말이다. 그 중에서도 유도 전동기는 범용으로 가장 많이 쓰이고 있는 전동기로서 공장용에서부터 가정용에 이르기까지 그 용량과 용도는 매우 다양하다. 유도 전동기 중에서도 3상 유도 전동기는 산업 현장의 공작 기계, 양수 펌프, 엘리베이터, 컨베이어 벨트, 방적기 등과 같이 큰 용량의 기계 장치를 움직이는 동력으로 사용하고 있다. 반면에 단상 유도 전동기는 선풍기, 냉장고, 세탁기, 에어컨 등의 가전 제품과 같이 작은 동력을 필요로 하는 곳에 주로 사용되고 있다.

이 단원에서는 유도 전동기의 작동 원리와 구조, 운전 방법과 특성, 그리고 특수 유도 전동기에 대하여 학습하도록 한다.



세탁기



엘리베이터



유도기의 원리와 구조

학습 목표 |

1. 유도기의 개요와 회전 원리를 설명할 수 있다.
2. 유도기의 원리와 구조를 설명할 수 있다.

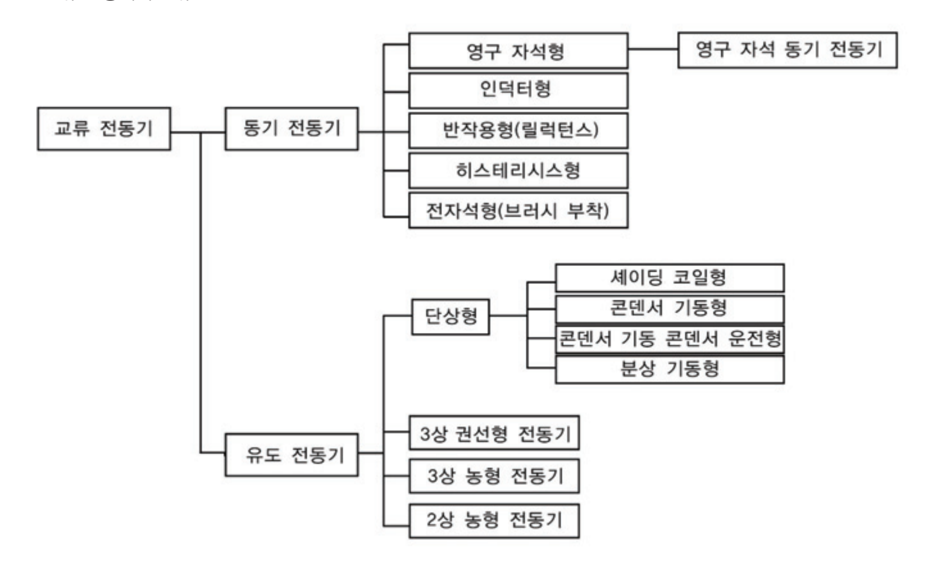
1 유도기의 개요

유도기는 정지기와 회전기로 크게 구분되며 대표적인 정지기는 변압기이며 회전기는 유도 전동기와 유도 발전기라고 할 수 있다. 회전기인 유도 전동기는 고정자에 감긴 1차 권선에 흐르는 교번 전류에 의하여 만들어지는 회전 자계와 회전자에 감긴 2차 권선의 유도 작용에 의하여 발생하는 유도 전류가 상호간에 작용하여 회전력을 발생시켜 작동한다. 이 때문에 유도기라고 부른다.

회전기 중에서 대표적인 교류 전동기는 표 Ⅱ－1과 같이 동기 전동기와 유도 전동기로 크게 구분할 수 있다. 일반적인 3상 농형 유도 전동기의 외형과 그 정격에 대한 제원 명판 내용을 그림Ⅱ－1에 보이고 있다. 제원 명판에는 출력, 사용 전압, 주파수, 회전수, 정격 전류, 절연 계급 등의 정격 사항이 기록되어 있다.

유도기의 회전 원리는 회전 자기장에 의하여 회전자 코일에 유기된 전류와 회전 자계와의 상호 작용에 의하여 전자력이 발생되어 회전자를 회전시키게 된다.

표 Ⅱ－1 교류 전동기의 분류





프레임 71	형식 GTFOA	10-6-987
출력 1/4 HP0.2[kW]	모델 KMi200K7	전압 220/380 [V]
주파수 60[Hz]	극 수 4P	회전수 1720 [rpm]
전류 1.2/0.7[A]	효율 65[%]	
기동 계급 G	정격 40 [° C] 연속	
베어링(부하측) 6202ZZ	베어링(반부하측) 6202ZZ	
절연 계급 E	중량 6[kg]	
제조 연월	제조자	

3상 유도 전동기

그림 Ⅱ-1 유도 전동기의 외형 모습과 제원 명판

그림 Ⅱ-2와 같이 회전할 수 있게 만든 비자성 도체인 알루미늄이나 혹은 동으로 만든 원판 또는 원통 주위에 화살표 방향으로 자석을 회전시킨다. 이때, 회전자는 비자성체이므로 자석에 붙지 않는 데도 불구하고 마치 붙어서 따라 가는 것 같이 원판은 자석을 따라 느리지만 자석의 회전 방향을 따라 회전하게 된다. 또, 자석을 빨리 회전시키면 알루미늄 판도 빨리 따라서 회전하게 된다.

한편, 영구 자석을 시계 반대 방향으로 회전시키면 알루미늄 판도 따라서 시계 반대 방향으로 회전하게 된다. 이때, 영구 자석에 의한 자속이 원판을 자르게 되므로 전자 유도 법칙에 따라 원판에는 맴돌이 전류가 흐르게 된다.

자계 내에서 이 맴돌이 전류와 자속과의 사이에는 쇄교 자속이 발생하여 토크가 발생된다. 플레밍의 왼손 법칙에 따라 자석의 이동 방향과 같은 방향으로 전자력이 원판에 작용하여 원판은 자석이 회전하는 방향으로 이동하게 된다.

이와 같은 아라고(Arago) 원판의 회전 원리에서 알루미늄 원판 주변에 자석만 돌려주면 알루미늄 원판(유도 전동기 내부 회전자)도 자석을 따라 회전하게 되는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 전동기를 돌리기 위하여는 자석을 손으로 돌리지 않고, 전기적으로 돌리는 방법이 필요하게 된다.

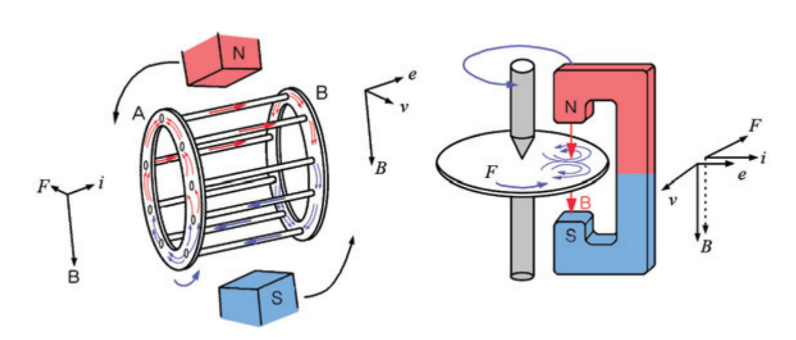


그림 Ⅱ-2 아라고 원판과 유도기의 회전 원리

즉, 1차측 회전 자계만 전압, 주파수 등의 제어를 통하여 회전시키게 되면 2차측 회전자도 아라고 원판처럼 1차측 회전 자계를 따라 회전하게 된다. 이것이 유도 전동기의 회전 원리이다.

2 유도 전동기의 회전 원리

1. 3상 권선에 의한 회전 자계의 발생 원리

3상 권선에 의한 회전 자계의 발생 원리는 다음과 같다. 3상 교류는 그림 Ⅱ-3과 같이 U상, V상, W상으로 구성되고, 각각의 전류 i_u, i_v, i_w를 그림 Ⅱ-4에 나타낸 고정자 권선에 흘리면 그림 Ⅱ-5에 나타낸 $t_1 \sim t_6$와 같은 회전 자계가 발생하여 유도 전류의 작용으로 회전자가 회전한다.

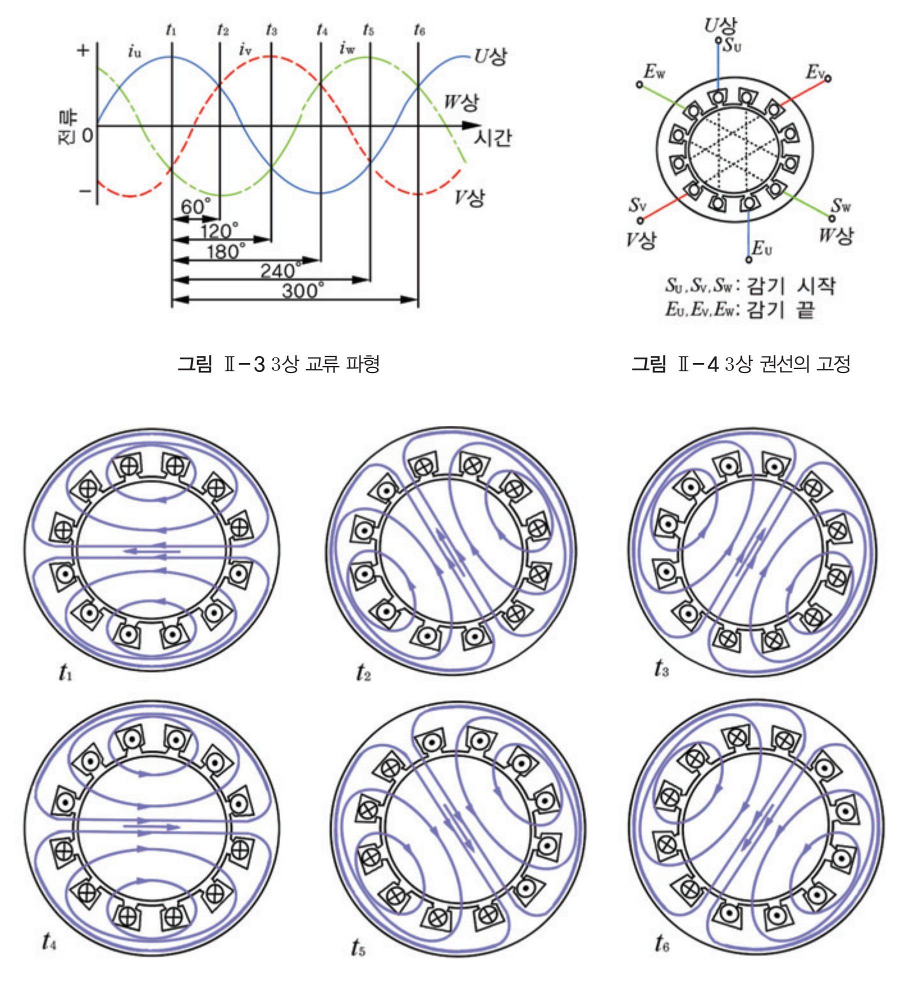


그림 Ⅱ-3 3상 교류 파형

그림 Ⅱ-4 3상 권선의 고정

그림 Ⅱ-5 3상 전압에 의한 회전 자계 발생 원리

2. 유도 전동기와 변압기와의 동작 원리 비교

변압기와 유도 전동기의 동작 원리를 간단히 비교하면 그림 Ⅱ-6과 같이 나타낼 수 있다. 변압기는 1차측의 전압이 2차측으로 유도되어 부하에 입력되는 반면에, 유도 전동기는 1차측 전압에 의하여 2차측으로 유기된 회전 자계에 의하여 회전자가 회전하는 것이다. 즉, 변압기에서는 1차, 2차에 유기되는 기전력은 교번 자계에 의한 것이지만, 유도 전동기에 있어서는 회전 자계에 의하여 기전력을 발생하는 점이 다르다.

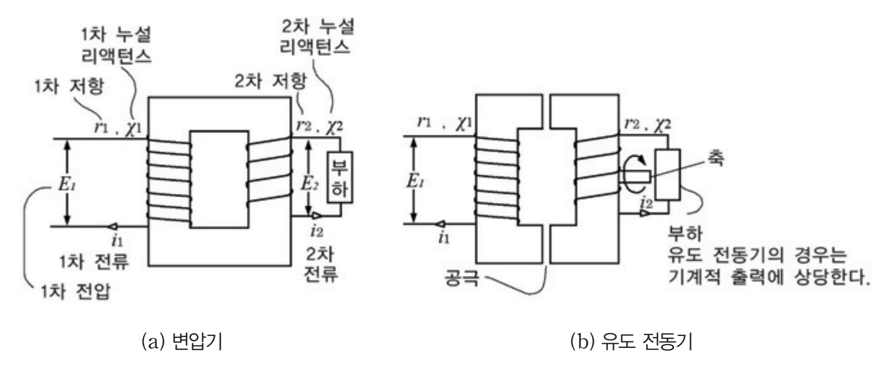


그림 Ⅱ-6 변압기와 유도 전동기의 비교

3 유도 전동기의 구조

유도 전동기의 구조는 고정자(stator)와 회전자(rotor)로 구성된다. 회전자는 권선형 회전자와 농형 회전자로 크게 구분할 수 있다. 그림 Ⅱ-7과 그림 Ⅱ-8은 유도 전동기의 구조이다. 유도 전동기의 고정자는 프레임으로 고정되며 회전자는 회전 축에 끼워 조립하고 베어링과 냉각 팬을 부착한 후, 나사 또는 볼트를 이용하여 고정자 프레임과 브래킷(brackets)을 고정시킨다.

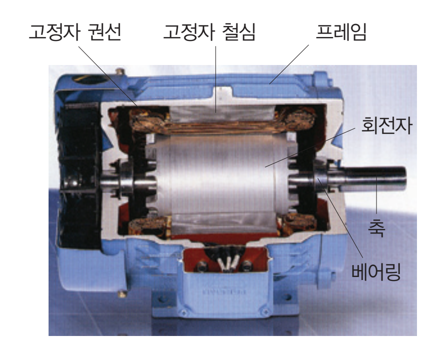


그림 Ⅱ-7 농형 유도 전동기의 단면도

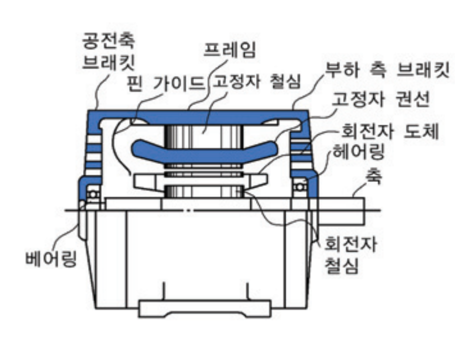
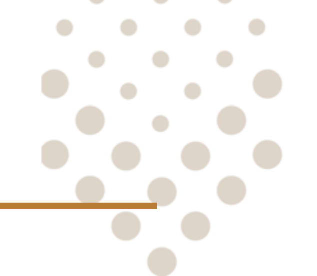


그림 Ⅱ-8 유도 전동기의 주요 구조



2 단상 유도 전동기

학습 목표 |

1. 단상 유도 전동기의 회전 원리를 설명할 수 있다.
2. 단상 유도 전동기를 기동 방법에 따라 분류하고 설명할 수 있다.
3. 단상 유도 전동기의 특성을 설명할 수 있다.

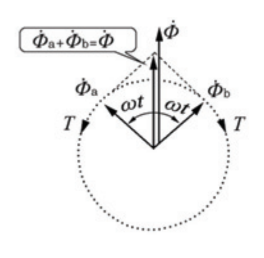
1 단상 유도 전동기의 회전 원리

1. 단상 유도 전동기의 기동 원리

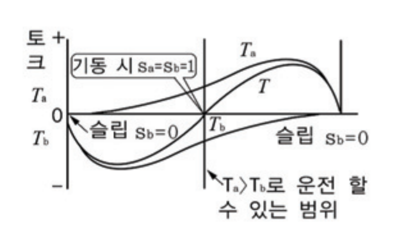
단상 유도 전동기(single phase induction motor)의 회전자 구조는 3상 농형 유도 전동기의 회전자와 같이 농형이고, 고정자 권선은 단상 권선으로 되어 있다. 전원이 3상인 경우에는 앞에서 설명한 것과 같이 회전 자계를 발생하는데, 단상 전원은 교번 자계이므로 회전 자기장이 발생되지 않는다. 따라서, 기동 시에 어떠한 방법으로든 회전 또는 이동 자계를 만들어 가속해 주어야 기동한다.

2. 단상 유도 전동기의 토크 특성

교번 자계는 그림 Ⅱ-9의 (a)와 같이 서로 반대 방향의 동기 속도로 회전하는 Φ_a, Φ_b로 분해하여 생각할 수 있다. 이 두 개의 회전 자속 Φ_a, Φ_b의 토크-속도 특성은 그림 Ⅱ-9의 (b)와 같고, 합성 토크는 T로 표현된다. 따라서, 회전 방향은 어느 방향이든 먼저 가해지는 방향으로 회전하게 된다. 단상 유도 전동기는 기동 시에 일정 방향으로 회전 토크가 발생하지 않으므로 별도의 기동 장치가 필요하다. 따라서, 기동 콘덴서 또는 운전 콘덴서 등을 부착하여 기동 시 토크를 강하게 하여 기동한다.



(a) 교번 자기력선속의 분해



(b) 토크-속도 특성

그림 Ⅱ-9 교번 자기력선속과 토크 특성

2 단상 유도 전동기의 기동 방식에 따른 분류

단상 유도 전동기는 단상 교류 전원에 연결하여 사용하고 적절한 기동 토크를 유지시켜 주어야 한다. 고정자 권선은 서로 자기적인 위치를 달리하면서 병렬로 연결된 주 권선과 기동 권선으로 구성되어 있으며, 기동 특성을 좋게 하기 위하여 기동 권선과 직렬로 기동 콘덴서를 부착한다.

기동 콘덴서는 기동 후에 일정 속도에 도달하면 자동적으로 전원으로부터 끊어지게 한다. 단상 유도 전동기는 기동 방식에 의하여 다음과 같이 분류할 수 있다.

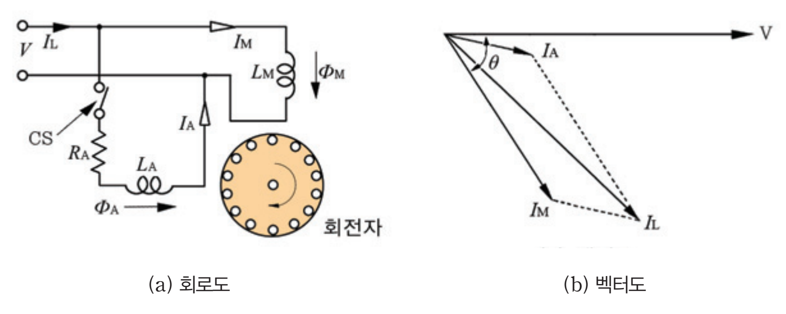
1. 분상 기동형 단상 유도 전동기

분상 기동형 단상 유도 전동기(split phase induction motor)는 전동기의 원활한 기동을 위하여 전기각을 $\pi/2$의 차이를 두고 주 권선과 기동 권선을 설치한 전동기이다. 이 기동 권선은 주 권선보다 가는 선이며 권선 수는 그다지 많지 않기 때문에 고저항, 저리액턴스로의 특성을 가지고 있다.

이 때문에, 전동기는 기동을 개시하고 일정 속도에 달하면 기동 권선에 달린 스프링과 원심력을 이용한 스위치에 의하여 기동 권선은 전원으로부터 자동으로 개방되어지고 교번 자계로 운전을 계속한다.

최근에는 원심력 스위치 대신에 서멀 릴레이(Thermal relay, 열 계전기) 또는 전류 감지기 등을 이용한 스위치를 사용하고 있다. 분상 기동형 단상 유도 전동기는 전기 냉장고, 전기 세탁기 등의 가정용 전기 제품에서 광범위하게 사용되고 있다.

기동 원리는 그림 Ⅱ-10의 (a)와 같이 순 리액턴스 성분의 주권선 L_M에 교류 전압 V를 가하여 θ 만큼 늦은 전류 I_M을 주권선에 흘린다.



(a) 회로도 (b) 벡터도

그림 Ⅱ-10 분상 기동형 단상 유도 전동기의 회로도와 벡터도

보조 권선 L_A와 원심력 스위치 CS, 권선의 저항 R_A를 직렬로 연결하여 주 권선 L_M에 대하여 병렬로 접속한다. 그 결과, 분상 기동되며 기동 전류 I_A가 흐른다.

이를 벡터도로 나타내면 그림 Ⅱ-10의 (b)와 같이 전류 I_M과 I_A 사이에는 위상차가 생기고, 이에 따른 자기력선속 Φ_M, Φ_A에 의한 회전 자기장이 만들어져서 기동 전류 I_L에 의하여 기동 토크가 발생한다.

그림 Ⅱ-10의 (a)에서 회전자 속도가 전원 주파수의 동기 속도에 대하여 약 70～80 % 정도가 되면 원심력 스위치 CS가 작동하여 보조 권선의 자기력선속 Φ_A가 자동으로 분리된다.

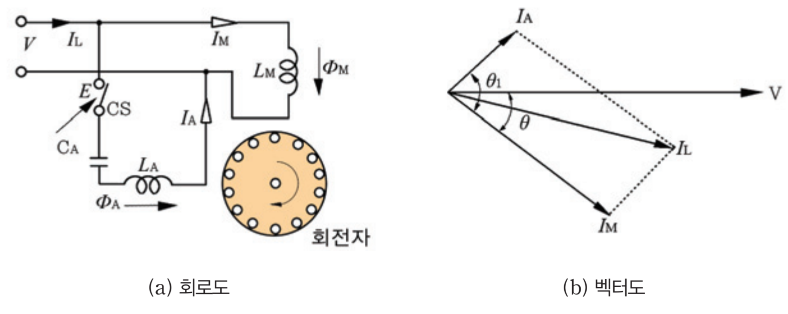
분상 기동형 단상 유도 전동기의 회전 방향을 바꾸기 위하여는 주권선 L_M과 보조 권선 L_A 중에서 어느 한 권선의 접속 단자를 바꾸어 교류 전원에 접속해 주면 된다.

2. 콘덴서 기동형 단상 유도 전동기

콘덴서 기동형 단상 유도 전동기(capacitor start induction motor)는 교류 전동기로 그 용도가 다양하다. 냉장고, 공기 압축기, 중유 원소기, 전기 세탁기, 펌프, 에어컨 등에 사용된다. 구조 면에서는 분상 기동형 전동기와 비슷하나 기동용 콘덴서가 기동 권선과 직렬로 연결된 점이 다르다.

콘덴서는 대개 전동기 상부에 부착되어 있는데, 전동기에 따라서는 전동기의 내부 또는 외부 다른 곳에 부착되어 있기도 하다. 주권선은 전원에 연결되어 있고, 보조 권선에는 콘덴서가 직렬로 연결된 회로 구조를 가지고 있는 전동기이다.

콘덴서 기동형 단상 유도 전동기의 회로는 그림 Ⅱ-11의 (a)와 같다. 기동하는 동안에는 원심력 스위치에 의하여 콘덴서가 붙은 상태로 되어 있으므로 운전 권선과 기동 권선이 함께 전원에 연결된다.



(a) 회로도 (b) 벡터도

그림 Ⅱ-11 콘덴서 기동형 단상 유도 전동기의 회로도와 벡터도

전동기의 속도가 전속도의 약 75 %에 도달하면 원심력 스위치가 개로되어 기동 권선과 콘덴서는 전원으로부터 개방된다. 결과적으로, 운전 권선만을 전원에 연결한 상태로 계속 운전된다.

콘덴서 전동기가 기동 토크를 발생하려면 전동기 내에 회전 자계가 발생하여야 한다. 회전 자계를 발생시키기 위하여는 기동 권선을 운전 권선보다 전기 각도로 90° 띄워 배치하면 된다. 이때, 콘덴서는 운전 권선에 흐르는 전류가 최댓값에 도달하기 전에 기동 권선에 흐르는 전류를 최댓값으로 올리는 데에 사용된다.

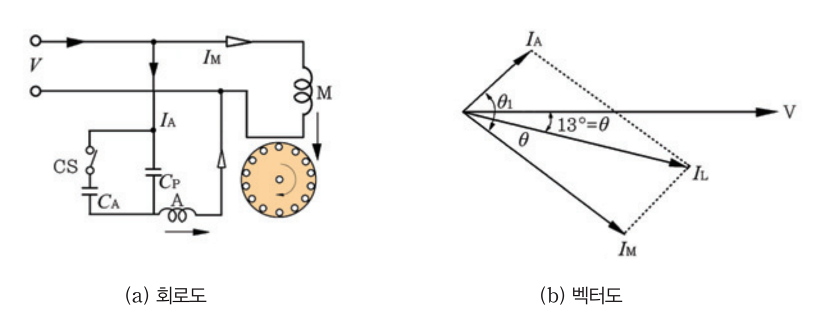
이를 달리 말하면, 콘덴서는 기동 권선에 흐르는 전류가 운전 권선에 흐르는 전류보다 앞서게 하는 역할을 하다. 따라서, 고정자에 회전 자계가 발생하고, 회전자 권선에는 유도 전류가 흐르게 되어 회전자는 회전 자계의 회전 방향으로 회전한다.

3. 콘덴서 기동 콘덴서 운전 단상 유도 전동기

콘덴서 기동 콘덴서 운전 단상 유도 전동기(single－value capacitor－run motor)는 기동 시에는 큰 정전 용량의 콘덴서를 사용하고 기동 후에는 적은 용량의 콘덴서를 계속 사용하는 전동기이다. 이 전동기는 다음과 같은 점을 제외하고는 콘덴서 기동형 전동기와 매우 유사하다. 특징은 운전 콘덴서와 기동 권선은 언제나 회로에 접속되어 있다. 이 전동기는 비교적 낮은 기동 토크에서도 소음 없이 부드럽게 작동한다. 콘덴서 기동 콘덴서 운전 단상 유도 전동기의 구동 원리는 그림 Ⅱ－12와 같다.

기동 시에는 그림 Ⅱ－12의 (a)에서 공급 전압 V보다 θ만큼 늦은 주권선 전류 I_M을 흘리면, 스위치 CS에 의하여 병렬로 접속되어 있는 진상 전류용 콘덴서 C_P와 C_A에 I_A의 진상 전류를 흘린다.

기동 이후 진상으로 분상된 전류에 의하여 운전 콘덴서 C_P는 접속된 채로 계속 운전되고, C_A만 원심력 스위치 CS에 의하여 전원으로부터 분리되어 OFF된다.



(a) 회로도　　(b) 벡터도

그림 Ⅱ－12 콘덴서 기동 콘덴서 운전 단상 유도 전동기의 회로도와 벡터도

기동 때의 주권선 전류 I_M과 기동 권선 전류 I_A의 위상차는 그림 Ⅱ-12의 (b)에서 $\theta \fallingdotseq 90^{\circ}$와 같다. 여기서 콘덴서 기동 콘덴서 운전 단상 유도 전동기는 역률이 90 % 이상이고, 기동과 운전 특성이 좋다.

4. 셰이딩 코일형 단상 유도 전동기

셰이딩 코일형 단상 유도 전동기(shaded-pole type single phase induction motor)는 회전자가 농형의 구조이고, 고정자의 주극을 돌극(salient pole)으로 하고 끝 부분에서 세돌극을 둔다. 세돌극에는 굵은 구리 선으로 두 번 정도 감아 단락시킨 셰이딩 코일(shading coil)을 설치하여 계속적으로 변화하는 자기력선속을 회전자에 통과시킨다. 그림 Ⅱ-13의 (a)에서 전동기의 동작 원리는 t_1 시점에서 고정자 권선 전류 $i = I_m \sin \omega t$를 흘려 준다. 이때, 최초의 적은 i_1에서 셰이딩 코일 쪽의 자기력선속 Φ_{B1}은 증가가 없고, 주극 자기력선속 Φ_{A1}은 증가한다.

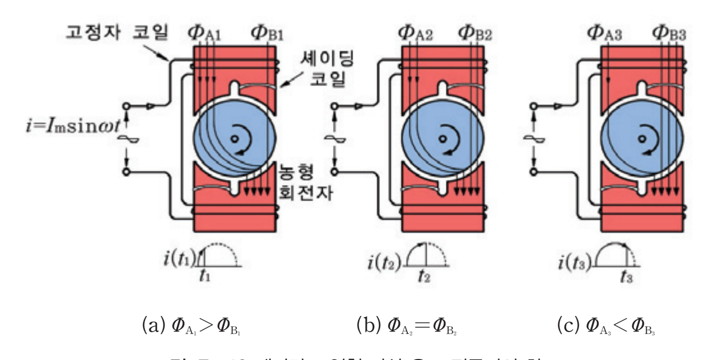
그림 Ⅱ-13 (b)의 t_2 시점에서 $\Phi_{A2} = \Phi_{B2}$가 되고, 그림 Ⅱ-13 (c)의 시점에서는 셰이딩 쪽 자기력선속이 증가하여, $\Phi_{A3} < \Phi_{B3}$이 된다. 이때, N=1의 셰이딩 코일의 단락 전류에 의한 반작용 자기장은 Φ_B 부분을 항상 θ만큼 위상이 늦어지는 이동 자기장을 만든다.

이때, Φ_A, Φ_B는 다같이 교번 자기력선속이므로, $\Phi_A \rightarrow \Phi_B$ 쪽으로 각각의 자극을 중심으로 하여 동심 원상(同心圓狀)의 맴돌이 전류 i_{2A}와 i_{2B}를 유도하고, 그 위상차는 90°가 된다. 따라서 원판에는 식 Ⅱ-1과 같은 토크가 작용하게 된다.

여자 코일에 가한 교류의 각 주파수가 ω[rad/s]일 때, 합성 구동 토크 T_d는 다음과 같이 된다.

$$T_d = k_d \Phi_A \Phi_B \sin \theta \,[\mathrm{N \cdot m}] \qquad (Ⅱ-1)$$

단, Φ_A는 Φ_{A1}, Φ_{A2}, Φ_{A3}이고, Φ_B는 Φ_{B1}, Φ_{B2}, Φ_{B3}의 순시값이다.



(a) $\Phi_{A_1} > \Phi_{B_1}$ (b) $\Phi_{A_2} = \Phi_{B_2}$ (c) $\Phi_{A_3} < \Phi_{B_3}$

그림 Ⅱ-13 셰이딩 코일형 단상 유도 전동기의 회로도

3 단상 유도 전동기의 특성

1. 단상 유도 전동기의 동기 속도와 토크 특성

단상 유도 전동기는 3상 유도 전동기와 같이 1상에 공급되는 사인파 전류에 의하여 회전 자기장이 발생되므로, 회전자 속도는 3상 유도 전동기의 회전 속도와 같다. 따라서, 1차 권선에 생기는 회전 자기장의 동기 속도는,

$$N_S = \frac{120f}{p} \text{[rpm]} \qquad (\text{Ⅱ}-2)$$

이다. 여기서, N는 회전 속도 [rpm], N_S는 동기 속도 [rpm], f는 전원 주파수, p는 극수이다.

또, 단상 유도 전동기의 슬립 s는,

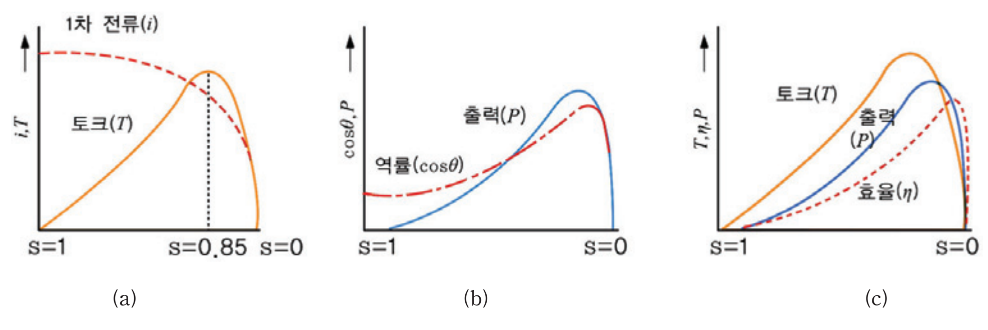
$$s = \frac{N_S - N}{N_S} \times 100 [\%] \qquad (\text{Ⅱ}-3)$$

이다. 그림 Ⅱ-14의 (a)는 단상 유도 전동기의 토크와 1차 전류를 슬립(속도)에 대하여 나타낸 곡선이다. 그림 Ⅱ-14의 (a)에서 슬립 $s=0.85$ 근처에서 최대 토크가 되며 1차 전류가 감소하기 시작한다. 일반적으로 단상 무부하 1차 전류의 비율이 매우 크다.

그림 Ⅱ-14의 (b), (c)는 각각 역률, 출력과 효율을 나타내며 3상 유도 전동기에 비하여 역률, 효율 등의 성능이 좋지 않다. 최대 토크 운전 범위가 좁고 동일 출력 대비 중량도 무거우며 제작비도 많이 든다.

그러나 단상 교류 전원에서 간단히 사용할 수 있는 이점이 있어서 가정용, 공업용, 농업용 등에서 주로 1[kW] 전후의 소동력용으로 널리 사용되고 있다.

특히, 단상 유도 전동기는 초기 기동 시에 일정 방향으로 회전 토크가 발생하지 않으므로, 기동 콘덴서와 원심력 스위치와 같은 기동 장치를 부착하여 원하는 방향으로 회전하게 되어 있다.



(a) (b) (c)

그림 Ⅱ-14 단상 유도 전동기의 출력과 토크 특성

4 단상 유도 전동기의 구조

단상 유도 전동기의 구조는 3상 유도 전동기와 대부분 같지만, 고정자 권선이 3상이 아닌 단상으로 구성되어 있는 점이 3상 유도 전동기와 다르다. 그림 Ⅱ－15는 단상 유도 전동기의 대표적인 예를 나타낸 것이다.

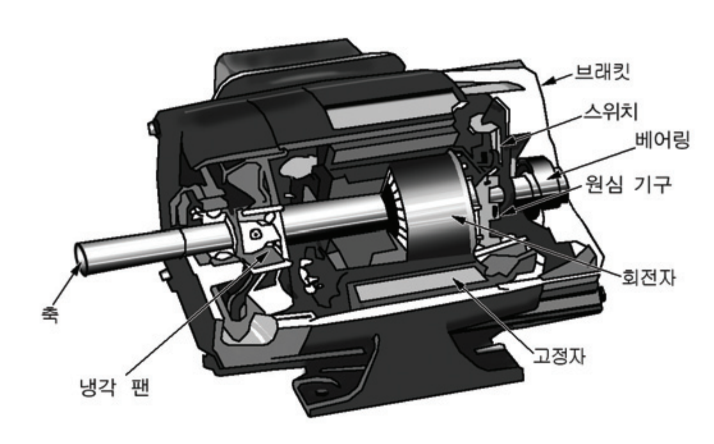


그림 Ⅱ－15 단상 유도 전동기의 외형과 내부 단면 구조도

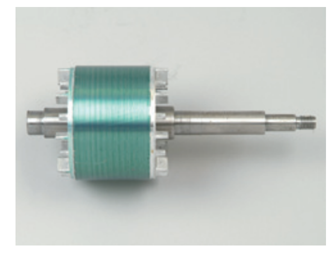
1. 단상 유도 전동기의 주요 구성 부품

단상 유도 전동기는 교류 전동기로서 전기 세탁기, 중유 연소기(oil－burner), 소형 펌프 등의 구동용으로 많이 사용된다. 이 전동기는 회전자(rotor)와 축, 그리고 베어링 등으로 구성된 회전부, 고정자(stator)와 고정자 권선, 철심, 프레임으로 구성된 고정부, 나사 또는 볼트에 의하여 고정자에 고착되어 있는 프레임 또는 브래킷(end plates or brackets), 기동 시 사용되는 전동기의 내부에 있는 원심력 스위치(centrifugal switch)의 네 가지 주요 부품으로 구성되어 있다.

(1) 회전자

유도 전동기의 회전자(rotor)는 그림 Ⅱ－16과 같다. 회전자는 세 가지 주요 부품으로 이루어져 있다. 회전자의 철심(core)은 라미네이션(lamination)이라고 불리는 자속 밀도가 높은 전기 규소 강판을 성층하여 제작하며 성층된 철심은 축(shaft)에 삽입하여 고정시킨다.

회전자의 권선은 철심 슬롯(slot)에 굵은 구리로 된 막대 도체를 넣은 후에 철심의 끝을 동환으로 동봉과 함께 납땜 또는 용접을 하여 제작한다. 최근에는 대부분의 단상 유도기의 회전자를 알루미늄 다이 캐스팅 방법으로 제작하고 있다.



(a) 회전자



(b) 철심



(c) 다이 캐스팅

그림 Ⅱ-16 알루미늄 다이 캐스팅 회전자

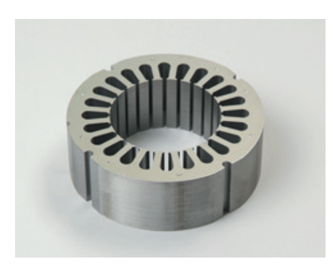
(2) 고정자

고정자(stator)는 철심, 프레임, 권선 등으로 구성되어 있다. 고정자 철심은 0.35 mm 두께의 규소 강판을 축 방향으로 성층하여 조립한다. 얇은 규소 강판 상에 반개구 슬롯(semiclosed slot)을 만든 후에 성층한다. 이 철심은 주철 또는 강판으로 만든 프레임 속에 고정하며, 슬롯 속에는 절연 동선으로 운전 권선(또는 주권선)과 기동 권선(또는 보조 권선)을 감는다.

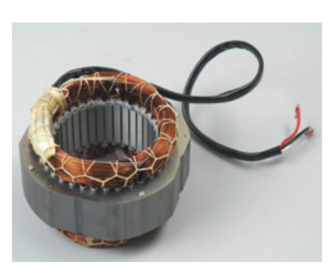
그림 Ⅱ-17은 고정자를 나타낸 것이다. 전동기가 기동할 때에는 운전 권선과 기동 권선이 동시에 전원에 연결되나, 기동하고 나서 일정한 속도까지 가속한 후에는 전동기의 내부에 위치한 원심력 스위치가 작동하여 기동 권선은 자동적으로 전원으로부터 개방된다.

일반적으로 유도 전동기에 있어서 여자 전류를 적게 하고, 역률을 높이기 위하여 공극은 좁게 설계한다. 그러므로 회전축이 휘면 공극의 일부분이 좁아지고, 이로 인하여 불평형 자기 흡인력이 커져 진동과 소음 발생의 주요 원인이 된다.

공극을 일정하게 유지하기 위하여는 고정자 프레임, 축, 베어링 등을 튼튼하게 만들 필요가 있다. 고정자 프레임은 종래에는 주철을 많이 사용하였으나, 최근에는 전동기의 무게를 줄이기 위한 목적으로 강판을 용접하여 사용하거나 알루미늄 재질을 사용하여 조립하는 방법을 많이 사용하고 있다.



(a) 철심



(b) 권선



(c) 프레임

그림 Ⅱ-17 고정자 철심, 권선, 프레임

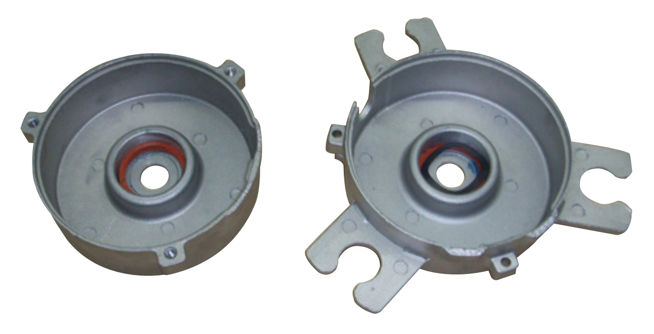


그림 Ⅱ-18 앤드 플레이트(브래킷)의 외관

(3) 앤드 플레이트(브래킷)

앤드 플레이트(end plates, bracket)는 나사 또는 볼트를 사용하여 고정자를 프레임에 고정시키는 역할을 한다. 회전자 축이 닿는 앤드 플레이트의 내경에는 볼 베어링 또는 원통 베어링이 들어 있다. 앤드 플레이트는 회전자의 무게를 견딜 수 있어야 하며, 또 회전자를 고정자 내의 중심 위치에 정확히 위치시켜 회전 중에 진동이 있거나 회전자가 고정자에 닿지 않게 하여야 한다. 브래킷(bracket)은 베어링을 지지하고 고정자와 회전자를 결합시킨다.

(4) 원심력 스위치

원심력 스위치(centrifugal switch)는 전동기의 내부에 위치하고 있으며, 그 기능은 전동기가 일정한 속도에 도달하였을 때에 기동 권선 또는 기동 콘덴서를 전원으로부터 분리시키는 역할을 한다.

(5) 냉각 팬

단상 유도 전동기의 내부에서는 고정자 철심, 회전자 철심의 자속 밀도와 고정자 권선의 전류 밀도에 의하여 열이 발생하게 된다. 또, 회전자 축과 베어링의 기계적 마찰에 의하여도 열이 발생하게 된다. 이를 제거하기 위하여 회전자 축의 끝부분에 냉각 팬(fan)을 부착하여 회전자가 회전할 때에 동시에 함께 회전하면서 전동기 내부의 열을 외부로 배출시킬 수 있게 냉각 팬을 부착하여 전동기를 냉각시킨다.

전동기의 프레임도 방열 효과를 효과적으로 하기 위하여 프레임의 외부 형상을 요철 형상으로 하여 공기와의 접촉 표면적을 최대화하게 되어 있다.

표 Ⅱ-2 단상 유도 전동기의 종류와 특성

형식	접속도	속도-토크 특성	출력(W)	극수	기동 토크
분상 기동형 모터	(기동 스위치) SW ST (주권선) (기동 권선) 농형 회전자	T 토크 회전 속도 n	20~400	2 4 6	중 125~200 %
콘덴서 기동형 모터	SW C_1 ST M 농형 회전자	T n	100~400	2 4 6	대 200~300 %
콘덴서 운전형 모터	C A M (보조 권선) 농형 회전자	T n	35~200	2 4 6	소 50~100 %
콘덴서 기동 콘덴서 운전형 모터	SW C C_1 A M 농형 회전자	T n	100~750	2 4 6	대 250~350 %
반발 기동 세이딩 코일형 모터	M 정류자가 있는 분포 농형 회전자	T n	100~750 (1000)	4	극대 400~600 %
	M 세이딩코일 농형 회전자	T n	14~10	2	소 40~50 %

3 3상 유도 전동기의 동작 원리

학습 목표 |

1. 유도 전동기의 기본 원리와 아라고의 원판에 대하여 설명할 수 있다.
2. 전자 유도 현상을 설명할 수 있다.
3. 유도 전동기의 회전 원리를 설명할 수 있다.
4. 3상 유도 전동기의 구조를 설명할 수 있다.
5. 3상 유도 전동기의 회전 자기장에 대하여 설명할 수 있다.
6. 3상 유도 전동기 동기 속도에 대하여 설명할 수 있다.

1 아라고의 원판

유도 전동기의 기본 원리는 아라고의 원판(Arago's disk)이다. 이것은 아라고(Arago, Francois, 1786~1853)가 실험한 것으로 그림 Ⅱ-19의 (a)와 같이 구리 또는 알루미늄으로 만든 원판을 수직으로 지지하고, 그 원 둘레에서 자극 N-S가 화살표의 방향으로 빨리 움직이면 원판은 자석보다 늦게 같은 방향으로 움직인다. 그 까닭은 그림 Ⅱ-19의 (b)에서 자석의 위쪽은 N극, 아래쪽은 S극이므로 자극 내에서 원판이 시계 반대 방향으로 운동하는 것과 같으므로 플레밍의 오른손 법칙을 적용하면, 원판 속에 생기는 기전력의 방향은 원판 중심으로 향한다.

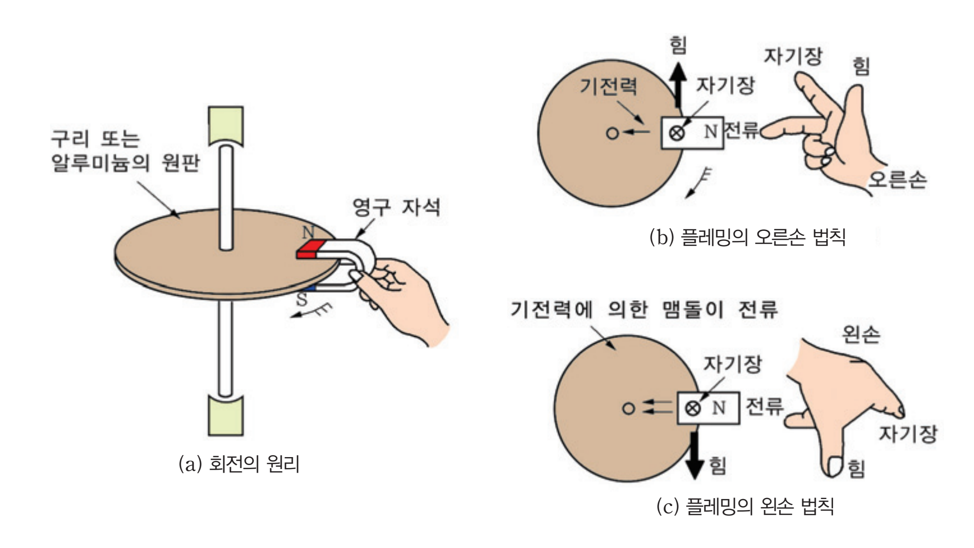


그림 Ⅱ-19 유도 전동기의 동작 원리(아라고의 원판)

유도 전동기는 이러한 원리를 이용한 것인데, 실제의 3상 유도 전동기에서는 자석을 돌리는 대신에 고정된 3상 권선에 3상 교류를 흘렸을 때에 생기는 회전 자기장을 이용한다. 이것은 1886년 니콜라 테슬라(Nikola Tesla, 1856~1943)가 처음으로 이용하였으며, 고정자 철심에 3상 권선을 설치하여 3상 교류를 가하면 회전 자기장이 형성되고, 여기에 회전자를 설치하면 아라고의 원판과 같이 회전하게 된다. 즉, 전류가 흐르면 전류와 자속의 상호 작용으로 힘이 발생하여 원판이 회전한다.

2 전자 유도 현상과 유도 전동기의 회전 원리

그림 Ⅱ-20과 같이 회전하는 자극, 극의 중심축 상에 폐회로를 구성하고 있는 코일을 넣으면 코일 내에는 자극의 회전을 방해하려는 방향으로 기전력이 발생하여 전류가 흐르고, 이 전류와 자속의 사이에 플레밍의 왼손 법칙에 따라 자극의 회전 방향과 같은 방향의 힘이 발생한다. 이 힘의 발생으로 코일은 회전하는 자극을 따라 회전하게 되고 이러한 원리를 적용한 전동기를 유도 전동기라고 한다. (아라고의 원판 설명 참조)

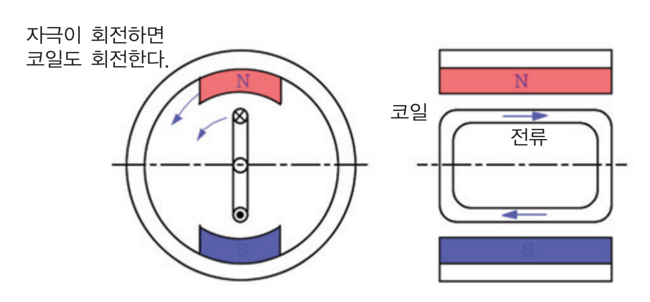
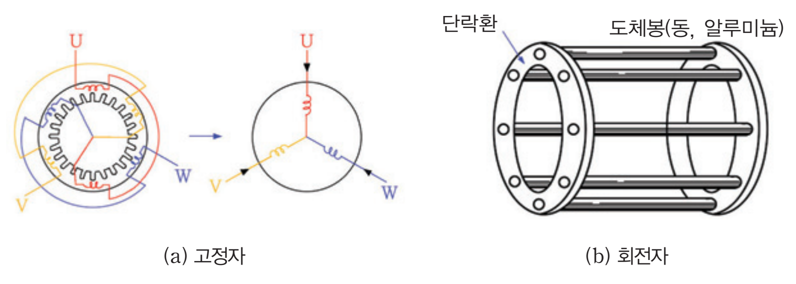


그림 Ⅱ-20 유도 전동기의 회전 원리

그림 Ⅱ-21의 (a)와 같이 자극을 회전시키는 대신 고정자 슬롯에 3상 권선을 공간적으로 120° 간격으로 대칭되게 배치하고, 3상 교류를 흐르게 하면 동기 속도로 회전하는 회전자가 발생하여 자극 N-S가 회전하는 것과 동일한 작용을 할 수 있다.



(a) 고정자 (b) 회전자

그림 Ⅱ-21 고정자 3상 권선 및 회전자

회전자는 고정자와 같이 3상의 권선이 감겨져 있는 권선형 회전자와 그림 Ⅱ-21(b)의 회전자와 같이 권선 대신에 동바 또는 다이 캐스팅된 알루미늄 막대의 구조로 된 농형 회전자의 두 가지가 있으며, 각각 용도에 따라 사용되고 있다.

3 3상 유도 전동기의 구조

3상 유도 전동기는 고정되어 있는 고정자 부분과 회전하는 부분인 회전자로 크게 구분할 수 있다. 3상 유도 전동기의 외형과 내부 구조는 그림 Ⅱ-22와 23과 같다.

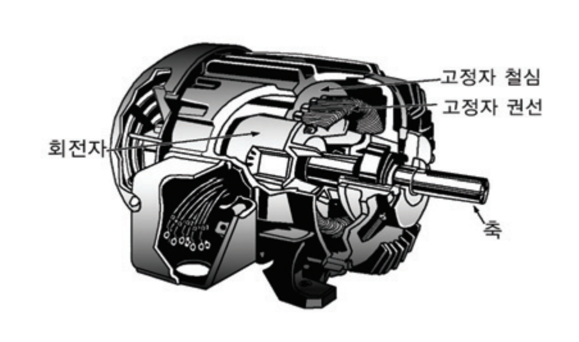


그림 Ⅱ-22 3상 농형 유도 전동기

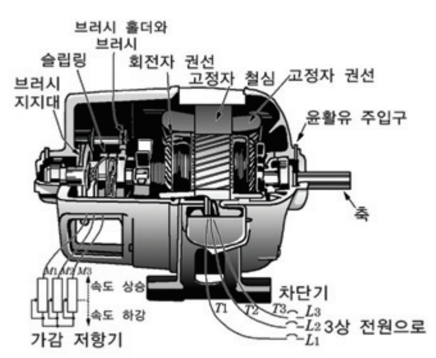


그림 Ⅱ-23 3상 권선형 유도 전동기

1. 고정자

고정자는 고정자 틀(frame)과 고정자 철심(core), 그리고 고정자 권선의 세 부분으로 구성되어 있다. 고정자 틀은 고정자 철심을 고정시키며, 고정자 철심은 고정자의 권선을 감는 지지물로서 자기 저항이 적으며 자기력선속 통로의 역할을 한다.

고정자 철심은 0.35 mm 두께의 규소 강판을 축 방향으로 성층하여 조립한다. 소형의 전동기에 있어서는 강대에서 원판을 찍어 내는데, 대형의 전동기에서는 원판을 등분한 부채꼴 모양으로 찍어 내어 원주 상으로 배열하여 원판을 형성한다.

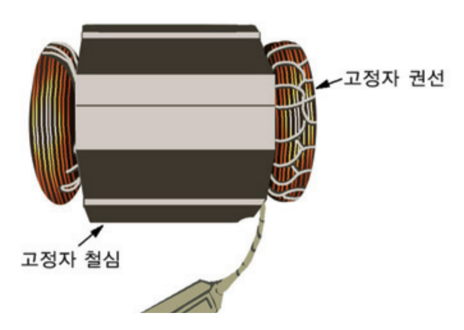


그림 Ⅱ-24 유도 전동기의 고정자 철심




그림 Ⅱ-25 고정자 틀

고정자 슬롯(홈, slot)의 형상은 저압 기계에서는 반폐 슬롯(semi closed slot)을 사용하고 고압 기계에서는 개방 슬롯(open slot)을 사용한다. 개방 슬롯을 사용하면 권선의 절연과 권선변을 삽입하는 작업이 쉬우나, 전동기의 크기가 다소 커지고, 또 철손과 여자 전류가 커지므로 그만큼 효율과 역률이 떨어진다. 고정자 틀의 외관은 그림 Ⅱ-25와 같으며 대용량의 고정자 틀은 주철로 되어 있다.

2. 회전자

회전자(rotor)는 축, 철심, 권선의 세 부분으로 되어 있으며 농형 회전자(squirrel type rotor)와 권선형 회전자(wound type rotor)가 있다.

(1) 농형 회전자

농형 회전자는 권선형 회전자에 비하여 구조가 간단하고 가격이 저렴하며 취급하기 쉽다. 그러나 기동 전류가 큰 데 비하여 기동 토크가 작은 결점이 있기 때문에 농형 회전자는 소형 전동기에 많이 사용되었으나, 최근에는 2중 농형(double squirrel cage) 또는 딥슬롯(deep slot)형으로 제작하여 기동 특성이 현저하게 개선되어 대형의 전동기에도 농형 회전자를 사용한다. 농형 회전자의 봉 도체로 원형 또는 평각 단면의 경동 봉을 사용한다.

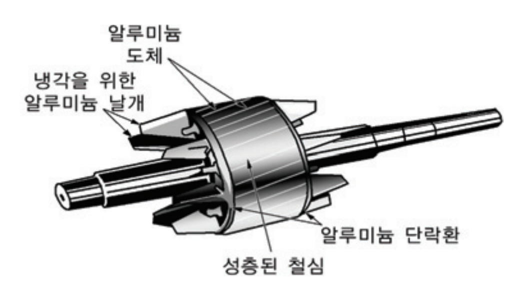


그림 Ⅱ-26 유도 전동기의 농형 회전자

최근 구리를 절약하는 동시에 대량 생산을 목적으로 슬롯 내에 알루미늄을 녹여 넣고, 이것을 도체로 하는 알루미늄 회전자가 많이 사용된다.

이 방법을 주입법, 즉 다이 캐스팅(die casting)이라고 하며 가장 많이 사용된다. 알루미늄 회전자 제작 시 단락 환, 봉도체, 통풍 팬(fan)을 동시에 주입 제작할 수 있어 제작 공정이 간단하다.

(2) 권선형 회전자

유도 전동기가 운전 중에는 회전자 측의 주파수는 극히 낮으므로 회전자의 철손은 문제가 되지 않는다. 그러므로 철손이 적은 규소 강판을 사용할 필요는 없으나, 표면 손(surface loss)과 맥동 손(pulsation loss)을 적게 하기 위하여 역시 규소 강판을 성층하여 회전자 철심을 조립한다.

권선형 회전자를 사용하는 경우에는 대부분 중용량 이상의 기계에 사용되고 있다. 슬롯 수는 고정자의 슬롯 수보다 많은 것이 보통이다. 매극 매상의 수로 말하면 회전자는 고정자보다 하나 더 많은 경우가 대부분이다.

권선형 회전자는 큰 전류가 흐르는 대형 전동기에서는 평각 구리 선을 슬롯 속에 끼우고, 그 양 끝을 구부려 3상 접속을 하며 권선형 회전자 내부 권선의 결선은 일반적으로 Y 결선으로 한다.

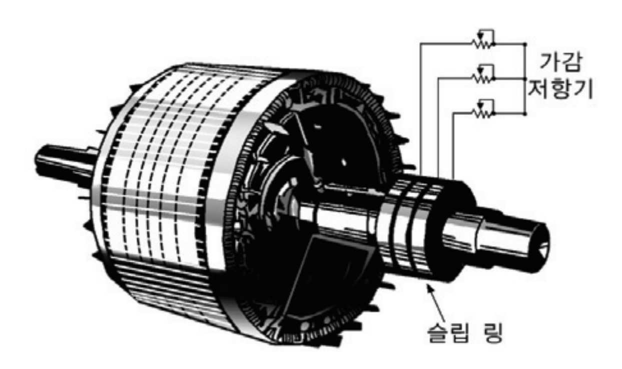


그림 Ⅱ-27 권선형 유도 전동기의 권선형 회전자와 가감 저항기의 접속

3. 축과 베어링

회전자 축(shaft)은 회전자 철심을 지지하며 회전의 중심이 된다. 유도 전동기의 공극은 다른 전동기에 비하여 대단히 좁고 축의 벤딩 스트레스(bending stress)에 대하여는 충분히 견디어야 한다.

일반적으로 축의 벤딩 스트레스는 에어 갭의 길이의 1/500 이하인 것이 요구된다.



그림 Ⅱ-28 3상 유도 전동기의 축 회전자와 베어링 조립

축의 재료로서는 보통 단강을 사용하고, 특히 큰 강도를 필요로 하는 경우에는 니켈-크롬강을 사용한다.

베어링(bearing)으로는 원통 베어링, 볼 베어링 등을 사용하고 있다. 원통 베어링은 견고하고, 또 베어링 벨트가 마모하는 경우에 수리가 간단하므로 대형 기계와 고속 기계에 사용된다. 볼 베어링을 사용하면 급유를 하지 않아도 되며 마찰 손이 적어 한 공장 내에 여러 개의 전동기를 단독으로 운전하는 경우에 많이 사용된다. 그러나 볼 베어링은 충격에 약하고 고속 회전 시에 소음을 발생하므로 무리하게 사용하거나 고속 회전을 필요로 하는 곳에서는 사용하지 않는다.

축의 길이와 굵기는 회전자의 중량과 형상에 대하여 휨이 없어야 하며, 특히 회전자가 회전할 때에 발생하는 관성에도 변형이 되지 않게 되어 있다. 그러므로 길이가 긴 축은 회전자의 형상이 지름 대비 폭의 비율이 크고, 관성이 적은 전동기에 적용된다.

4 3상 유도 전동기의 회전 자기장

1. 3상 고정자 권선의 배치

3상 유도 전동기에서 3상 사인파 교류 전원에 의한 회전 자기장을 얻기 위하여는 그림 Ⅱ-29과 같이 원둘레형으로 고정자 권선을 배치한다.

① u, v, w 3상 권선 중에서 $u \sim u'$ 상 고정자 권선을 중심 위치로 정한다.

② u 상에 대하여 $v \sim v'$ 상을 전기각 120°에 배치한다.

③ u 상에 대하여 $w \sim w'$ 상을 전기각 240°에 배치한다.

④ 단자 U, V, W에서 3상 전류 i_u, i_v, i_w를 흘려 공급한다.

⑤ 고정자 내의 공간에는 그림 Ⅱ-30의 (b)와 같이 3상 자기력선속 Φ_u, Φ_v, Φ_w가 공간 합성되어 벡터 Φ_R의 회전 자기장으로 나타난다.

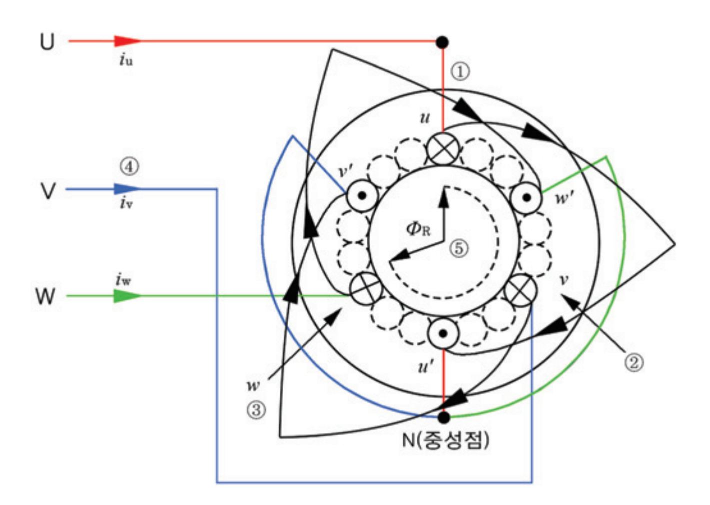


그림 Ⅱ-29 3상 유도 전동기의 고정자 권선도

2. 3상 교류와 회전 자기장

3상 전류 i_u, i_v, i_w를 그림 Ⅱ-29에 공급할 때, 그림 Ⅱ-30의 (a)에서 t_1 시점으로부터 t_6 시점까지 3상 전류가 진행하면서 발생되는 자기장을 살펴보면 다음과 같다.

① 그림 Ⅱ-30의 (a) t_1 시점에서 $i_u = I_m$, $i_v = -\frac{1}{2}I_m$, $i_w = -\frac{1}{2}I_m$의 전류가 흐르고, 이때 각각의 순시 자기력선속 벡터 Φ_{ut1}, Φ_{vt1}, Φ_{wt1}은 그림 (b)의 ① $t=t_1$에서 합성 자기력선속 벡터 Φ_{Rt1}이 되어 $-x$ 축을 기점으로 회전 벡터의 시작이 된다.

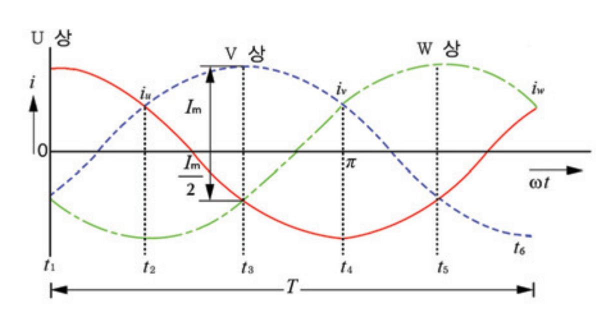
② $t=t_2$ 때에는 Φ_{Rt1}에서 60° 진행된 위치로 회전하여 Φ_{Rt2}가 된다.

③ 또, $t=t_3$에서는 t_1에 대하여 120° 진행하여 Φ_{Rt3}가 된다.

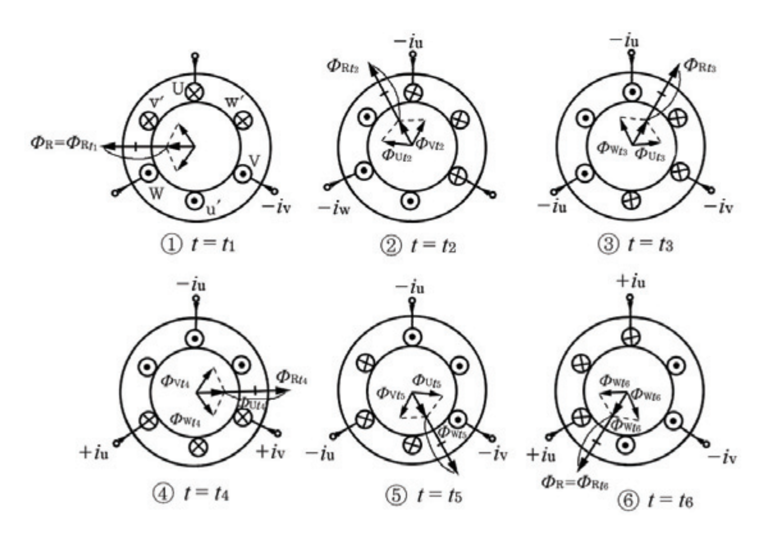
④ $t=t_4$에서는 Φ_{Rt4}가 되어 π 만큼 회전한 자기장 벡터가 된다.

⑤ $t=t_5$에서는 Φ_{Rt5}가 되어 240° 회전한 자기장 벡터가 된다.

⑥ $t=t_6$에서는 Φ_{Rt6}, 즉 300° 회전으로 되고, 다시 60° 진행되어 원형 1회전 자기장이 된다.



(a) 3상 전류, 파형의 진행



(b) 3상 순시 합성 벡터의 회전

그림 Ⅱ-30 3상 교류와 회전 자기장

3. 3상 유도 전동기의 동기 속도

(1) 회전 자기장의 속도

회전 자기장 벡터 Φ_R가 그림 Ⅱ-30의 (b)에서와 같이 1회전할 때에 걸리는 시간인 1주기는 그림 Ⅱ-30의 (a)에서 3상 교류 전원의 한 주기 T와 같다. 따라서, 1초 간의 1회전 전류의 속도인 주파수 f에 대하여 회전 자기장 Φ_R의 속도 n은 식 Ⅱ-4로 되고 주기 T의 역수가 된다.

$$n = \frac{1}{T} = f \text{[rps]} \qquad (Ⅱ-4)$$

즉, 2극의 유도 전동기에서 회전 자기장은 교류의 1주기 동안에 고정자 앞의 원형 공극을 1회전한다. 주파수 f의 교류에 의하여 만들어지는 회전 자기장 회전수는 f가 된다. 또, 1분 동안의 회전수 N은 다음과 같다.

$$N = f \times 60 \text{[rpm]} \qquad (Ⅱ-5)$$

(2) 동기 속도

동기 속도(synchronous speed)는 그림 Ⅱ-29에서 고정자 권선의 1상은 u~u'로서 2극, 즉 극수 $p=2$로 마주 보게 되어 있으므로, 이때의 회전 자기장의 속도는 그림 Ⅱ-30에서 교류 파형의 1주기마다 $\frac{2}{p}$ 회전하게 된다. 교류 파형의 주파수가 f이면 회

전 자기장의 회전 속도 n은 f배이므로 $n=\frac{2}{p}f$[rps]가 된다. 또, 회전 속도를 1분(60초) 동안의 회전수 N_s로 나타내면 단상 유도 전동기의 동기 속도는 식 Ⅱ-2와 동일하게 된다.

(3) 동기 속도와 슬립

유도 전동기의 동기 속도란 1차 측 교류 공급 전원에 의하여 발생되는 3상 회전 자계의 회전 속도를 의미하며 $N_s=\frac{120f}{p}$ [rpm]으로 표현된다.

여기서 N_s: 동기 속도, f: 전원 주파수, p: 유도 전동기의 자극(pole) 수이다.

또, 슬립(slip)이란 전동기의 1, 2차 회전 속도의 비를 나타내는 상수로서, 1차측 회전 자계의 회전 속도를 동기 속도(N_s)라고 하면, 슬립은 다음과 같이 표현된다.

$$s=\frac{\text{동기 속도}(N_s)-\text{2차 회전자 속도}(N)}{\text{동기 속도}(N_s)} \qquad (\text{Ⅱ}-6)$$

정지 상태의 슬립: $s=\frac{N_s-0}{N_s}=1$

동기 속도의 슬립: $s=\frac{N_s-N_s}{N_s}=0$

무부하 운전 시는 거의 동기 속도로 회전하게 되어 매우 작은 토크가 발생된다. 따라서, 유도 전동기의 슬립 범위는 보통 전 부하 운전 상태의 슬립 $s=2.0\sim5\%$ 정도이다.

전동기 역회전 시의 슬립: $s=\frac{N_s-(-N_s)}{N_s}=2$

그러므로, 유도 전동기의 슬립 범위는 정지 시 $s=1$, 동기 속도로 운전 시 $s=0$, 역회전 시 $s=2$이다. 따라서, 유도 전동기의 슬립 범위는 $0\leq s\leq2$이다.

예제 1 단상 유도 전동기의 동기 속도가 1800[rpm]이고, 회전자의 속도가 1700[rpm]일 때에 슬립은 얼마인가?

풀이 |

식 (Ⅱ-3)에 의하여

$$s=\frac{N_s-N}{N_s}\times100=\frac{1800-1700}{1800}\times100=5.5\ \%\text{이다.}$$



3상 유도 전동기의 기전력과 토크 특성

학습 목표 |

1. 3상 유도 전동기의 기전력과 출력 토크 특성을 설명할 수 있다.
2. 3상 유도 전동기의 부하 특성 시험과 무부하 특성 시험을 할 수 있다.

1 유도 전동기의 유도 기전력과 출력

1. 권선형 유도 전동기의 회전자 유도 기전력

유도 전동기의 고정자 권선에 전류를 흘려서 자기장을 발생시키면, 회전자 권선에는 2차적으로 유도 기전력이 유도된다.

유도 전동기의 고정자 권선과 회전자 권선은 그림 Ⅱ－31과 같은 변압기의 원리로 나타낼 수 있으며, 1차와 2차 권선이 자기적으로 결합되어 있다.

그림 Ⅱ－31의 (a)에서 교류 입력 전압 V_1을 1차 고정자 권선에 가하면 1차 권선의 여자 전류 I_0과 회전자 쪽의 출력 전달 전류 I_1'의 합인 1차 전류 $I_1=I_0+I_1'$가 흐른다. 여자 전류 I_0은 1차 쪽의 철심에 자기력선속 Φ_1을 만든다. 그리고 2차 쪽의 가동 철심 내에 그림 Ⅱ－31의 (b)와 같이 Φ_1을 통과시키고 공극 부분에서 $\Phi_1=\Phi_0$인 공극 자기장 Φ_0을 만든다. 1차 쪽의 권선 수 N_1은 전원 입력 전압 V_1에 대하여 마주쳐 밀어 올리는 유도 기전력 E_1을 만들어

$$E_1=-N_1\frac{d\Phi_1}{dt}\,[\mathrm{V}] \qquad (\text{Ⅱ}-7)$$

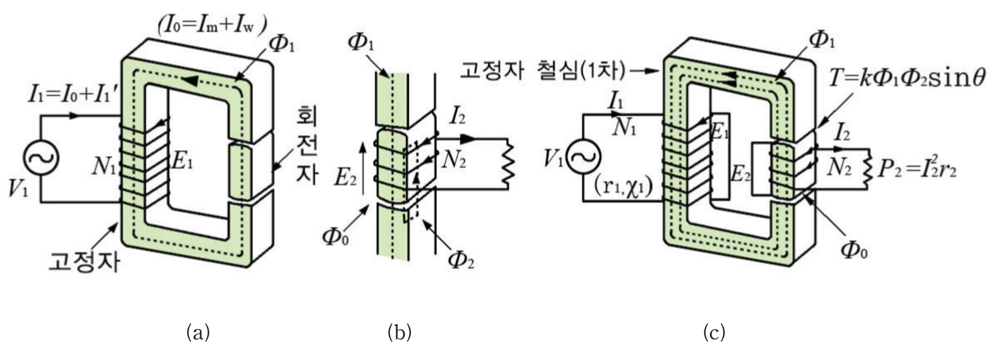


그림 Ⅱ－31 유도 기전력의 발생 원리

가 된다. 그림 Ⅱ-31의 (b)에서 2차 쪽의 권선 N_2에도 또 유기 기전력 $E_2 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}$ [V]와 단락 전류 I_2가 흐르고, 따라서 Φ_2가 생긴다.

이때, 공극에는 Φ_1과 Φ_2에 의한 토크 T가 식 Ⅱ-8과 같이 발생된다.

$$T \propto \Phi_1 \Phi_2 \sin\theta \text{ [N·m]} \qquad (Ⅱ-8)$$

그림 Ⅱ-31의 (c)에서 유도 전동기의 회전자가 정지하여 있을 때에는 입력 전압 V_1은 1차와 2차 유도 기전력 E_1, E_2를 누르고 2차 쪽의 전류 I_2를 공급할 수 있는 V_1과 I_1이 전원 쪽에서 공급되어야 한다. 이때, 공극 자기력선속 Φ_0은 Φ_1과 Φ_2의 합이 되고, 출력은 $P_2 = I_2^2 r_2$가 된다.

2 3상 유도 전동기의 기계적 출력

1. 3상 유도 전동기의 전기–기계적 토크

3상 농형 유도 전동기의 에너지 변환에 대한 흐름은 그림 Ⅱ-32와 같다. 3상 유도 전동기의 고정자에서 고정자 입력 P_1은, 1차 전류 I_1에 의한 고정자 구리 손 $P_{c1} = I_1^2 r_1$과 고정자 철심에서 발생되는 자기적 철손 P_i에 의하여 에너지가 소모된다. 그리고 소모된 에너지를 제외한 유효한 에너지의 입력은 $P_2 = I_2^2 r_2$로서, 공극을 통하여 회전자에 저장된 후에 2차 회전자에서 발생되는 구리 손 P_{c2}와 풍손 P_w의 손실을 빼고, 회전자의 슬립 부하 쪽에 P_{2s}의 입력으로 작용된다.

이때, 회전자에서 2차 전류 I_2에 의하여 발생되는 2차 회전자 구리 손 P_{c2}는 식 Ⅱ-9만큼 소모된다.

$$P_{c2} = I_2^2 r_2 \text{ [W]} \qquad (Ⅱ-9)$$

출력 슬립 부하 쪽에 주는 전기적 출력, 즉 2차 입력 P_{2s}는 식 Ⅱ-10으로 된다.

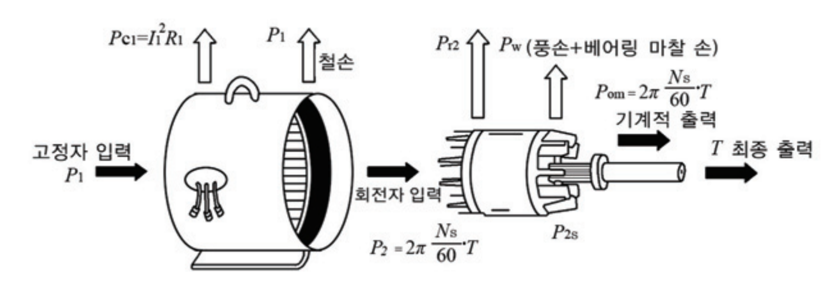


그림 Ⅱ-32 기계적 에너지 변환 흐름도

$$P_{2s}=I_2^2 \cdot \frac{r_2}{s}\ [\mathrm{W}] \qquad (\mathrm{II}-10)$$

결국, 전동기의 슬립 지연된 기계적 출력 P_{om}은 다음과 같다.

$$P_{om}=P_{2s}-P_{c2}=\frac{I_2^2 r_2}{s}-I_2^2 r_2=I_2^2 R_2\ [\mathrm{W}] \qquad (\mathrm{II}-11)$$

I_2는 실효값이고, P_{om}은 슬립 저항 $R_2=\frac{r_2(1-s)}{s}$인 부하에서 소비되는 출력 전력이다. 즉, 실제 P_{om} 만큼의 에너지가 기계적 동력으로 변환되는 것이다.

기계적 출력은 $P_{om}=\omega T$이고, $\omega=\frac{2\pi}{60}\mathrm{N}$이므로 출력 토크 T는,

$$T=\frac{60P_{\mathrm{om}}}{2\pi N}\ [\mathrm{N \cdot m}] \qquad (\mathrm{II}-12)$$

로 된다. 또, 전기적 토크는 $T=\frac{P_{2\mathrm{s}}}{2\pi N_s}$이고, 동기 와트(synchronous watt) 토크라고 한다. 결과적으로, 슬립 운전되는 전동기 토크는 식 Ⅱ-13으로 된다.

$$T=\frac{60P_{\mathrm{om}}}{2\pi N_{\mathrm{s}}} \cdot \frac{sE_2^2 r_2}{r_2^2+(sx_2)^2}\ [\mathrm{N \cdot m}] \qquad (\mathrm{II}-13)$$

위의 식에서 토크 특성을 고찰하면 운전 중의 토크는 E_2^2에 비례하고, 또 그림 Ⅱ-31에서 V_1이 가변되면 I_1과 Φ_1이 가변되어 $E_2=-N_2 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt}$에서 E_2가 가변되는 특성이 있다.

즉, E_2는 공급 전압 V_1에 비례하므로, 식 Ⅱ-13에서 이를 N(속도)$-T$(토크) 출력 특성을 고찰하면 그림 Ⅱ-33과 같다.

① 기동 토크 T_s는 식 Ⅱ-13에서 $s=1$일 때이고, 그림 Ⅱ-33에서 ①로 시작된다.

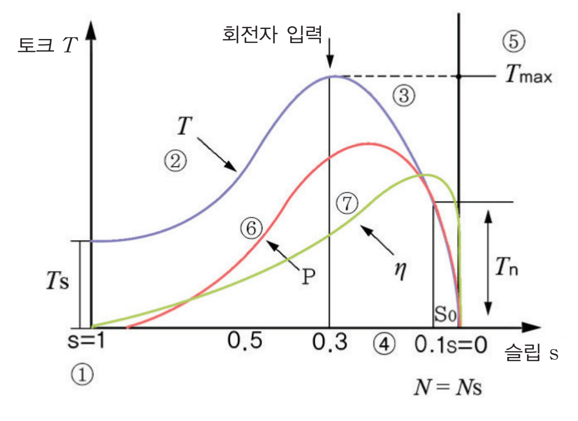


그림 Ⅱ-33 슬립 속도와 토크 특성 곡선

② 기동이 끝나기까지는 $(sx_2)^2 \gg r_2^2$이므로, r_2^2을 무시하면 토크는 슬립에 반비례한다. (T 곡선 ② 참조)

③ 회전 속도가 증가하여 s가 매우 작게 되면 $(sx_2)^2 \ll r_2^2$이 되므로, $(sx_2)^2$을 무시하면 T는 슬립 s에 비례한다.

④ 안정 운전 영역은 $s=0.3 \sim 0.1$ 근처의 정격 토크 $T_{max} \sim T_n$ 범위 근처이다.

⑤ 식 Ⅱ－13에서 $\dfrac{r_2^2}{s} = sx_2^2$이 될 때에 최대 토크 T_{max}가 구해진다.

$$T_{max} = \frac{60}{2\pi N_s} \cdot \frac{E_2^2}{2x_2} \text{ [N·m] (그림 Ⅱ－33에서 } s=0.3 \text{ 근처)} \qquad (\text{Ⅱ}-14)$$

⑥ 곡선 P_{om}는 식 Ⅱ－14에 의하고,

⑦ 곡선 η는 P_1과 P_{om}의 비로서 전동기의 효율 곡선이다.

2. 2차 저항 증가에 따른 비례적 토크 추이 특성

유도 전동기의 토크(돌림힘) 발생 원리는 회전 자계의 회전 속도, 즉 동기 속도보다 회전자의 회전 속도가 느리거나 빠를 때에만 자속을 쇄교하여 기전력이 발생하게 되고, 같은 속도에서는 자속을 쇄교할 수 없어 토크를 발생시킬 수 없다. 무부하에서는 슬립이 아주 작게 되고, 따라서 토크도 회전자를 겨우 회전할 정도로만 회전 토크가 발생하게 된다. 유도 전동기의 속도는 1차 전압, 주파수, 부하의 크기, 2차 권선 저항 등에 의하여 가변시킬 수 있다. 3상 유도 전동기에서 전원 전압을 일정히 하고 슬립(속도)을 변화시킬 때에 속도에 대한 1차 전류, 출력과 토크의 관계를 유도 전동기의 속도－토크 특성 곡선이라고 한다.

3상 유도 전동기에서 전원 전압을 일정하게 하고 슬립(속도)을 변화시킬 때에 속도에 대한 1차 전류, 출력과 토크의 관계는 전동기 운전에 매우 중요한 특성이다. 전동기는 근본적으로 정격 속도 이하의 속도에서는 어느 속도에서도 기계 부하를 구동시

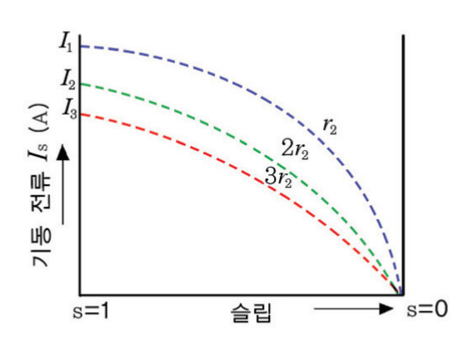


그림 Ⅱ－34 권선형 유도 전동기의 기동 토크 특성 곡선

킬 수 있어야 하므로 속도 변화에 따른 토크 관계는 부하 특성에 큰 영향을 준다. 그림 Ⅱ-34는 권선형 유도 전동기의 2차 저항 가변에 의한 속도-토크 특성을 나타낸 것으로, 권선형 유도 전동기의 2차 저항 변화에 따른 기동 전류의 변화로 권선형 유도 전동기의 기동 토크 특성 곡선이라고 한다.

다음은 유도 전동기의 슬립 변화에 대한 속도-토크 특성을 알아보고, 권선형 유도 전동기의 토크와 전류의 비례 추이에 대하여도 알아본다.

그림 Ⅱ-35에서 권선형 유도 전동기의 2차측 저항을 r, $2r$, $3r$로 증가시킴에 따라, 토크의 최댓값이 곡선의 왼쪽($s=1$)으로 이동되고 있음을 보여 주고 있다. 이를 권선형 유도 전동기의 토크의 비례 추이 곡선(Proportional Shifting)이라고 한다. 이 곡선으로 알 수 있는 것은 기동 시 토크를 높이기 위하여는 권선형 유도 전동기 2차 저항을 증가시켜 주면 되며, 속도 증가에 따라 토크의 최댓값을 그대로 유지시키기 위하여는 2차 저항을 감소시켜 주어 속도 변화에 따라 2차 저항을 제어해 줄 필요가 있음을 보여 주고 있다. 2차 저항기를 사용하므로 2차 저항으로 임의의 최대, 최소 토크를 선택할 수 있다는 장점이 있지만 운전 시에 손실이 크고 효율이 나쁘며, 특히 감속 시 외부 2차 저항에서 큰 손실이 발생하여 효율이 매우 떨어지는 단점이 있다.

슬립 링(slip ring), 브러시(brush) 등에서 고장이 잦으므로 유지 관리에 유의하고 사용 환경을 고려하여야 한다.

유도 전동기는 크레인, 압축기, 압연기, 블로어, 펌프 등의 일반용 산업 기계에 널리 사용되어 왔다. 그림 Ⅱ-36은 유도 전동기의 1차 단자 전압을 100 %, 80 %, 50 %로 감소시키며 인가 시 토크 특성을 보여 주고 있다. 따라서, 이 그림으로부터 단자 전압 변동만으로 토크를 제어할 수 있고, 토크의 변경은 부하가 일정할 때에 전동기 속도 변화로 이행된다. 즉, 부하가 일정할 때에 유도 전동기 1차 단자 전압의 변동만으로 전동기 속도를 제어할 수 있음을 보여 주고 있다.

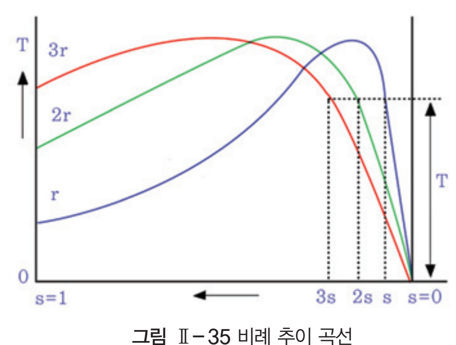


그림 Ⅱ-35 비례 추이 곡선

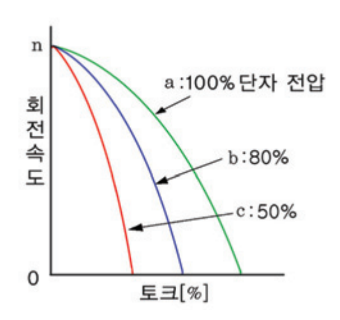


그림 Ⅱ-36 1차 단자 전압을 100 %, 80 %, 50 % 인가 시 토크 특성

3. 3상 유도 전동기의 기동 방식과 기동 특성

유도 전동기는 기동할 때에 정상 운전 시보다 약 5~6배의 많은 기동 전류가 흐르게 되어 전동기에 무리가 가게 된다. 이를 방지하고 기동 시 흐르는 많은 전류를 줄이기 위하여 여러 가지의 기동 방식을 채택하고 있으며, 기동 방식별 특성을 표 Ⅱ-3에 도시하였다.

3상 유도 전동기를 원활하게 운전시키기 위하여는 전동기의 종류와 용량, 사용 전압 등에 따라 기동 방식이 각각 다르다.

표 Ⅱ-3에 표시한 바와 같이 전전압 기동, Y-Δ(Star-delta) 기동, 리액터(Reacter) 기동, 1차 저항 기동, 소프트스타터 기동 방식 등이 있다.

전전압 기동(line starting) 방식은 정지하고 있는 전동기에 정격 전압을 직접 가하는 방법이며, 저전압의 소용량 또는 특수 농형 유도 전동기의 기동 방식으로 적용되고 있다. 기동 토크가 커서 기동 시간이 짧은 장점이 있다.

1차 권선에 있는 각 상의 양쪽 끝을 단자를 인출하여 놓고, 기동할 때에는 스위치를 기동 측으로 전자 접촉기를 사용하여 1차 권선을 Y로 접속하여 기동 후에 정격 속도의 90 %에 가까워지면 운전 측으로 전환하여 Δ결선을 하여 운전하는 방식이다 .

Y-Δ 기동 방식은 전전압 기동이 곤란할 때에 고정자의 3상 권선을 먼저 전자 접촉기에 의하여 Y 결선으로 접속한다. 이는 고정자 권선을 $\sqrt{3}$배로 확장하여 전동기의 한 상에는 전원 정격 전압보다 $\frac{1}{\sqrt{3}}$배 만큼 적은 전압이 걸리게 하여 기동한 후에 회전 속도가 정격 속도의 90 % 정도에 가까워지면 기동 전류는 감소하게 된다. 이때, 고정자 권선을 Δ 결선으로 바꾸어 줌으로써 3상 전원이 고정자 3상에 전전압이 공급되게 되는 기동 방식이다.

그 밖에 유도 전동기의 1차 측에 가감 리액턴스, 또는 저항을 직렬로 접속하여 기동 전류를 제한하고 가속 후에 이것을 단락시키는 방법이 있다.

표 Ⅱ-3 3상 유도 전동기의 기동 방법

항목	기동 방법				
	전전압	Y-Δ	리액터	1차 저항	소프트스타터
개요	전동기에 처음부터 전전압을 인가하여 기동함.	Δ 결선으로 운전하는 전동기를 기동 시만 Y 결선으로 기동함. 기동 전류를 전전압 기동 시의 1/3로 줄임.	전동기의 1차 측에 리액터를 넣어 기동 시에 전동기의 전압을 리액터의 전압 강하분 만큼 낮추어서 기동함.	리액터 기동의 리액터 대신 저항기를 넣은 것임.	무접점 SCR 소자를 이용하여 기동에 알맞는 저전압부터 전전압까지 서서히 증가시키면서 저전류로 기동함.
회로 구성	M	M	M	M	M
특징	가속 토크가 커서 기동 시간이 짧다.	최대 기동 전류에 의한 전압 강하를 경감시킬 수 있다. 감압 기동기로서는 가장 손쉽게 채용한다.	탭 전환에 따라 최대 기동 전류, 최소 기동 토크가 조정 가능하다.	리액터 기동과 거의 같다. 리액터 기동보다 가속 토크의 증대가 적다.	기동 시간, 토크의 크기를 부하에 따라 조정이 가능하여 저전류 기동이 가능하다. * 모터 보호 기능 - 과부하 시 Trip - 결상 시 Trip - 2차측 단락 시 Trip
결점	기동 전류가 크고 전압 강하의 원인이 된다.	최소 기동 가속 토크가 작으므로 부하 연결한 상태로 기동이 어렵고, 기동한 후에 운전으로 전환될때 전전압이 인가되어 전기적, 기계적 쇼크가 크다.	기동 전류에 비하여 기동 토크의 감소가 크다.	최소 기동 토크의 감소가 크다. 보통 적용 전동기의 용량은 7.5 kW 이하이다.	기동 시에 약간의 SCR 스위칭 노이즈가 발생한다.
적용	전원 용량이 허용되는 범위 내에서는 가장 일반적인 기동 방법임.	무부하 또는 경부하로 기동되는 75 kW 이하의 전동기에 사용함.	팬, 송풍기, 펌프 등이 있음.	소용량(7.5 kW 이하)에 한하여 리액터 기동용 부하와 동일하게 적용함.	어떤 부하에도 무관하게 적용 가능함.

실습
과제 1

무부하 특성 시험

전동기 자체의 철손, 구리 손, 마찰 손을 구하기 위하여 고정자측에 정격 주파수의 선간 전압을 SW_1에 의하여 공급하고, 입력 선전류와 전력을 측정한다.

<회로도>

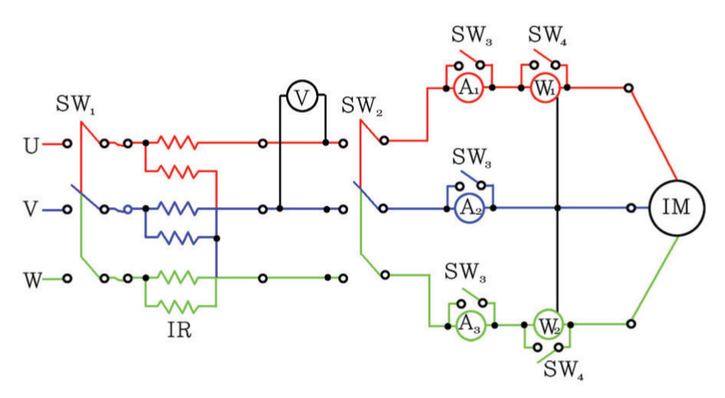


그림 Ⅱ-37 전동기의 무부하 특성 시험 결선도

사용 재료와 기기

3상 유도 전동기 (3상 380[V] 750[W]) 1대, 3상 380V상용 전원 (3[KVA]) 상용 전원, 단상 전력계 (0~1[kW]) 2대, 직류 분권 발전기 (1000[W]) 1대, 주파수계 (0~60[Hz]) 1대, 3상 유도 전압 조정기 (3상 0~400[V] 3[KVA]) 1대, 3상 스위치(3상 380[V] 10[A]) 2개, 단상 스위치(단상 220[V] 10[A]) 5개, 전류계(단상 교류 0~30[A]) 3대, 전압계(단상 교류 0~440[A]) 3대, 회전수[rpm] 측정기(0~5000[rpm]) 1대

안전과 유의 사항

1. 전력계의 전류 단자는 항상 단락시켜 놓고 측정값은 읽을 때에만 단락을 풀어 측정한다.
2. 유도 전압 조정기의 핸들이 최저 전압의 위치에 있는지를 확인한다.
3. 3상 유도 전동기의 회전자 축은 무부하로 한다.
4. 3상 유도 전동기에 부하를 건 채로 기동시키지 않게 한다.
5. 전력계 Ⓦ1, Ⓦ2 중에서, 한쪽 전력계의 지침이 반대로 움직일 때에는 전압 단자를 반대로 접속하고, 그 값을 (−)의 부호를 붙여 기록해야 한다.

실습 순서

1. 그림 Ⅱ-37과 같이 3상 전원을 U, V, W 단자에 접속하고 확인한다.
2. 스위치 SW_1을 넣고 3상 유도 전압 조정기 IR(induction voltage regulator)의 0의 위치에서, 즉 저전압으로부터 유도 전동기(IM)에 전압을 조절하면서 공급한다.
3. 정격 전압의 50～120[%]까지 변화시키면서 각 계기 Ⓥ, Ⓐ, Ⓦ에 나타난 값을 기록한다.
4. 전동기의 역률이 50[%] 이하가 되면 일련의 전력계는 부(−)로 된다. 각 계기의 지시로부터 다음의 식을 이용하여 역률($\cos\theta$), 전력, 유효분, 무효분 전류를 계산한다.

$$\cos\theta = \frac{P_0}{\sqrt{3}V_1 I_0}$$

5. V, I_1, I_2, I_3, P_1, P_2 회전수 N을 측정하고, 3상 유도 전동기의 무부하 특성 곡선을 그린다.

결과 정리

단자 전압 V[V]	무부하 전류 I_0[A]	무부하 손실			회전수 N[rpm]	$\cos\theta$	I_1[A]	I_ϕ[A]
		P_1	P_2	$P_0=P_1+P_2$				

실습 과제 2

부하 특성 시험

<회로도>

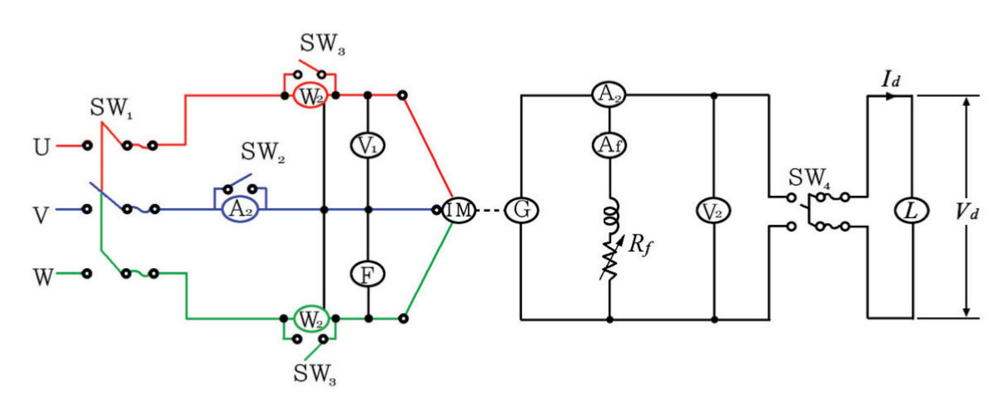


그림 Ⅱ-38 전동기의 부하 특성 시험 결선도

사용 재료와 기기

3상 유도 전동기(3상 380〔V〕 750〔W〕) 1대, 3상 (380V) 상용 전원(3〔KVA〕) 상용 전원, 단상 전력계(0~1〔kW〕) 2대, 직류 분권 발전기(1000〔W〕)1대, 주파수계(0~60〔Hz〕) 1대, 3상 유도 전압 조정기(3상 0~400〔V〕 3〔KVA〕) 1대, 3상 스위치(3상 380〔V〕 10〔A〕) 2개, 단상 스위치(단상 220〔V〕 10〔A〕) 5개, 전류계(단상 교류 0~30〔A〕) 3대, 전압계(단상 교류 0~440〔V〕) 3대, 회전수〔rpm〕 측정기(0~5000〔rpm〕) 1대

안전과 유의 사항

1. 전력계의 전류 단자는 항상 단락시켜 놓고 측정값은 읽을 때에만 단락을 풀어 측정한다.
2. 유도 전압 조정기의 핸들이 최저 전압의 위치에 있는지를 확인한다.
3. 3상 유도 전동기에는 부하를 연결하지 않은 상태(무부하 상태)로 기동시킨다.
4. 경부하일 때, 한쪽 전력계의 지침이 반대로 움직일 때에는 전압 단자를 반대로 접속하고 그 값을 (−)의 부호를 붙여 기록하여야 한다.

실습 순서

1. 그림 Ⅱ-38과 같이 회로를 접속하고, U, V, W 단자에 3상 전원을 접속한 후, 먼저 SW_2, SW_3를 닫은 다음에 SW_1을 닫아 3상 유도 전동기를 무부하로써 단독 기동 운전을 시킨다.
2. 3상 유도 전동기를 1~30분간 운전한 다음에 정격 주파수의 정격 전압으로 조정하고, 무부

하 전류 I_0, 무부하 입력 $P_1=P_{(1)}+P_{(2)}$(전력계 W_1, W_2의 지시값), 회전수 N을 측정하여 기록하고, 3상 유도 전동기를 정지시킨다.

3. 부하로써 효율을 알고 있는 직류 분권 발전기 G를 연결하여 운전하고, G가 정격 전압이 유지되게 R_f를 조정한 후에 SW_4를 닫아 유도 전동기에 직렬 연결하여 발전기 부하 L를 걸어 준다.
4. 부하 L과 발전기 여자 저항 R_f를 조정하여 IM이 정격 전압 V_{in}에, 정격 1차 전류 I_{in}이 되게 하여 전력계 W_1, W_2의 지시값 $P_{(1)}$과 $P_{(2)}$, G 쪽의 전압계 ⓥ2, 전류계 Ⓐ2의 지시값, 그리고 G의 단자 전압 V_d, 부하 전류 I_d와 V_d와 회전수 N을 측정하고, G의 여자 전류를 일정하게 유지시킨다.
5. L을 증가시켜 IM의 1차 전류를 정격값의 125[%]가 되도록 한 다음, 천천히 부하를 감소시켜 무부하가 될 때까지의 1차 전류 I_1에 의한 전력계값 $P_{(1)}$과 $P_{(2)}$에 대한 IM의 입력 P_1, G의 단자 전압 V_d, G의 부하 전류 I_d와 회전수 N을 측정한다.
6. 실습 순서 4의 결과로부터 정격 주파수 f, 정격 전압 V_in, 정격 전류 I_in에서의 전동기 입력 P_1, 역률 $\cos\theta$, 발전기 출력 P_d, 효율 η, 슬립 s, 토크 T 등을 다음 식들을 이용하여 산출한 다음에 기록한다.

$$P_1=P_{(1)}+P_{(2)} \qquad T=\frac{60P}{2\pi N}[\mathrm{N\cdot m}] \qquad \cos\theta=\frac{P_1}{\sqrt{3}V_\mathrm{in}I_\mathrm{in}}\times 100[\%]$$

$$s=\frac{N_\mathrm{s}-N}{N_\mathrm{s}}\times 100[\%] \qquad P_\mathrm{d}=V_\mathrm{d}I_\mathrm{d}[\mathrm{W}] \qquad P=\frac{P_\mathrm{d}}{\eta_\mathrm{s}}[\mathrm{W}] \qquad \eta=\frac{P}{P_1}\times 100[\%]$$

7. 실습 순서 5의 결과로부터 가로축에 유도 전동기의 출력 P, 세로축에 실습 순서 6에서 산출한 P_1, $\cos\theta$, η, s, T, N을 토대로 부하 특성 곡선을 그린다.

결과 정리

3상 유도 전동기의 부하 특성 시험

- 전동기의 정격 출력 ________ [kW 또는 hp]
- 발전기의 정격 출력 ________ [kW]
- 전동기 정격 전압 ________ [V]
- 정격 주파수 ________ [Hz]
- 실내 온도 ________ [℃]

3상 유도 전동기 쪽										부하용 발전기 쪽				비고
전류 I_1[A]	입력[W]			역률 $\cos\theta$ [%]	출력 산출 P[W]	효율 η [%]	회전수 N [rpm]	슬립 s [%]	토크 T [N]	전압 V_d [V]	전류 I_d [A]	출력 P_d [W]	기기 효율 η_g [%]	
	$P_{(1)}$	$P_{(2)}$	$P_{(3)}$											

단원 종합 문제

1 단상 유도 전동기의 종류에 속하지 <u>않는</u> 것은?

① 콘덴서 기동형 단상 유도 전동기
② 콘덴서 운전형 단상 유도 전동기
③ 저항 기동형 단상 유도 전동기
④ 콘덴서 기동 콘덴서 운전형 단상 유도 전동기
⑤ 분상 기동형 단상 유도 전동기

2 3상 유도 전동기의 주요 구성 요소가 <u>아닌</u> 것은?

① 고정자 ② 회전자 ③ 프레임 ④ 축 ⑤ 정류자

3 단상 유도 전동기의 특성을 바르게 설명한 것은?

① 단상 유도 전동기는 역율이 3상 유도 전동기에 비하여 좋다.
② 단상 유도 전동기는 기동 권선과 기동 장치가 있다.
③ 단상 유도 전동기는 기동 토크가 좋다.
④ 단상 유도 전동기는 슬립이 발생하지 않아 동기 속도로 회전한다.
⑤ 단상 유도 전동기는 소용량의 가전 제품에는 주로 사용하지 않는다.

4 유도 전동기의 회전 원리와 직접 관계되는 법칙은?

① 렌츠의 법칙 ② 키리호프의 법칙 ③ 플레밍의 왼손 법칙
④ 옴의 법칙 ⑤ 패러데이의 법칙

5 유도 전동기의 손실이 <u>아닌</u> 것은?

① 베어링의 마찰 손 ② 철손 ③ 구리 손
④ 소음 손 ⑤ 기계 손

6 3상 유도 전동기의 기동 방식이 <u>아닌</u> 것은?

① 전전압 기동 방식 ② Y-Δ 기동 방식 ③ 리액터 기동 방식
④ 1차 저항 기동 방식 ⑤ 원심식 기동 방식

정답 | 1 ③ 2 ⑤ 3 ② 4 ③ 5 ④ 6 ⑤ 7 ⑤ 8 ② 9 ① 10 ①

7 Y－Δ 기동 방식의 특징을 바르게 설명한 것은?

① Y－Δ로 결선을 변환 하는 까닭은 기동 전압을 높이기 위함이다.

② 기동시 기동 전류를 높게 하여 기동이 잘 되게 하는 방식이다.

③ 단상 유도 전동기의 기동 방식으로 기동 토크를 높히기 위한 기동 방식이다.

④ 기동 전류가 전전압 기동보다 높다.

⑤ 기동시 일정 회전력을 얻기 전까지 전전압의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$배 만큼 낮은 전압으로 기동한다.

8 유도 전동기에서 속도와 토크의 관계는?

① 대략 비례한다. ② 반비례한다. ③ 무관하다.

④ 토크의 제곱에 비례한다. ⑤ 속도의 제곱에 비례한다.

9 유도 전동기에서 정격 전압보다 낮은 전압이 단자에 인가되었을 때의 설명으로 옳은 것은?

① 최대 토크는 증가하고 전부하 전류는 감소한다.

② 최대 토크는 감소하고 전부하 전류는 증가한다.

③ 최대 토크는 감소하고 전부하 전류는 감소한다.

④ 최대 속도도 증가하고 전부하 전류는 감소한다.

⑤ 최대 속도도 증가하고 전부하 전류도 증가한다.

10 농형 3상 유도 전동기의 무부하 시험으로 알 수 있는 것은?

① 부하 없이 운전되므로 전동기 자체의 철손과 구리 손을 알 수 있다.

② 전동기의 최대 발생 열을 확인할 수 있다.

③ 역률이 높은지 낮은지를 확인할 수 있다.

④ 전동기의 정격 전류를 알 수 있다.

⑤ 전동기의 정격 출력을 알 수 있다.

인용 및 참고 문헌

- 김상진(1998). 최신 전기 기기. 서울: 세화. pp. 199~244
- 김영조, 신재화(2004). 소형 모터. 서울: 보문당. pp. 63~207
- 정승기, 이향범(2003). 전기 기기. 서울: 사이텍미디어. pp. 140~327
- 松井信行(1990). 電氣器機. 日本: 森化出版. pp. 114~140
- 梅木一良 외(1999). 實習 電氣器機. 日本: OHM社. pp. 49~78
- 五十嵐 孝仁(1999). 標準 電氣器機. 日本: OHM社. pp. 119~178